

XUEQI FENXI LINGHUANGJIESHI

刘明 刘林一等 编著

张 强 林 强 审校

血气分析 临床解释

武汉大学第一附属医院呼吸内科研究室



译 者 的 话

近年来由于血气测定仪的不断改进，操作大为简便，且迅速、准确。血气分析在抢救危重病人中的作用亦日益受到重视，已逐渐成为临床必要检查项目之一。很多地区、省、市都先后举办了血气学习班。但在国内，系统介绍血气的书籍不多，为此译者曾于1980年译了1976年諏访邦夫所著“临床血气”（日文，内容主要为生理、测定、示范题、理论等四大部分），即将由上海科技出版社出版。同年冬在湖北省卫生局慢性气管炎办公室所办的血气学习班上，试用了山林一等所编的“血气分析临床解释”部分章节，得到学员们的一致好评，认为此书理论结合实践，描述详细，值得临床医师一读。为此，在武汉市第四医院江国梅副主任医师、江苏镇江地区人民医院检验科顾可梁主任、我院内科王怀德医师、放射科副教授王丽雅及李光祖同志等协助下，共同译成此书。

本书发行过程中，承蒙湖北省卫生局慢性气管炎办公室、上海中山医院麻醉科主任吴珏教授、本院刘树茂院长、内科主任沈迪副教授、麻醉科主任刘俊杰副教授、检验科刘永佳主任等的鼓励与支持，本院沈既复医师、邬炎卿同志制图，苑陵、刘泗珍同志的协助，谨致谢忱。

由于译者的外文、业务水平所限，缺点、错误必不少，务望读者给予指正。

张瑞祥

一九八二年三月

目 录

I 血液气体测定的基础

血液气体的含义	(1)
一、血液气体与酸碱平衡	(1)
二、血液气体的物理、化学	(4)
血液气体的生理学	(11)
一、肺功能与血液气体	(11)
二、氧合与氧的运输	(26)
三、CO ₂ 的运输与pH	(29)
四、组织呼吸	(37)

II 血液气体测定结果的分析

低碳酸血症	(39)
一、病因	(39)
二、表现形式	(40)
三、各种疾病中的病况	(42)
四、处理	(46)
高碳酸血症	(48)
一、病因	(48)
二、表现形式	(50)
三、各种疾病中的病况	(51)
四、处理	(54)
低氧血症	(55)
一、病因	(57)

二、表现形式	(59)
三、各种疾病中的病况	(65)
四、非低 PaO_2 所致的 CaO_2 的降低	(69)
五、处理	(71)

高氧血症	(72)
------	------

酸硷平衡失常	(72)
--------	------

一、所谓酸硷平衡	(72)
二、酸硷平衡的基本事项	(73)
三、酸硷平衡的指标	(81)
四、酸硷平衡失常的判断	(84)
五、引起酸硷平衡失常的病况	(95)

血液气体异常时电解质的变化	(97)
---------------	------

一、血液气体、酸硷平衡、电解质	(97)
二、高碳酸血症与电解质的变化	(99)
三、低碳酸血症与电解质的变化	(101)
四、低氧血症与电解质的变化	(101)
五、代谢性酸中毒与电解质的变化	(102)
六、代谢性硷中毒与电解质的变化	(104)

III 血液气体的临床应用

急性呼吸衰竭	(105)
--------	-------

一、引起急性呼吸衰竭的疾病	(107)
二、急性呼吸衰竭的症状	(109)
三、急性呼吸衰竭的病理生理	(110)
四、呼吸衰竭的病情估价	(116)
五、治疗急性呼吸衰竭时血液气体的测定	(127)

慢性呼吸衰竭	(134)
--------	-------

一、引起慢性呼吸衰竭的疾病	(134)
---------------	-------

二、慢性呼吸衰竭的酸碱平衡的特征·····	(148)
三、慢性呼吸衰竭患者日常管理 & 治疗中所 必需的血气测定·····	(148)
四、血液气体测定对慢性呼吸衰竭患者手术 危险性的估价·····	(154)
脑神经的障碍 ·····	(155)
一、血气异常所引起的脑神经功能障碍·····	(156)
二、脑功能障碍所引起的呼吸异常·····	(159)
三、意识障碍时的血液气体·····	(163)
四、脑卒中时的血液气体·····	(165)
肾脏疾患 ·····	(168)
一、肾功能衰竭·····	(168)
二、肾小管性酸中毒·····	(179)
心脏疾患 ·····	(182)
一、急性心肌梗塞与危险的心肌缺血·····	(183)
二、心肌梗塞急性期的低氧血症·····	(184)
三、心肌梗塞急性期的过度通气与酸碱平衡·····	(185)
四、氧气疗法的一些问题·····	(188)
内分泌及代谢疾患 ·····	(189)
一、糖尿病酮症酸中毒·····	(189)
二、非酮症高渗性昏迷·····	(194)
三、乳酸酸中毒·····	(195)
四、甲状腺功能亢进·····	(198)
五、甲状腺功能减退·····	(198)
六、盐类皮质激素分泌过多·····	(198)
七、盐类皮质激素分泌不足·····	(201)
消化道疾患 ·····	(202)

- 一、消化液丢失所引起的呼吸及血气的异常·····(203)
- 二、横膈、腹肌等呼吸肌的机械性运动障碍·····(207)
- 三、疾患本身或其并发症所致的呼吸及血气的异常··(207)

麻醉·····(213)

- 一、血气测定的意义·····(213)
- 二、引起动脉血气异常的主要原因·····(215)
- 三、呼吸中枢·····(215)
- 四、通气量与肺泡气·····(217)
- 五、动脉血 CO_2 分压·····(218)
- 六、人工呼吸·····(220)
- 七、 PO_2 ·····(221)
- 八、混合静脉血·····(228)
- 九、细胞的 O_2 供·····(229)
- 十、其他·····(229)

术后管理·····(233)

- 一、刚手术后出现的血液气体异常·····(233)
- 二、手术本身以及其他原因所致的血气异常·····(240)
- 三、术后肺并发症的防治·····(247)

集中监护治疗·····(248)

- 一、急性成人呼吸窘迫综合症·····(250)
- 二、人工呼吸器的适应证·····(259)
- 三、人工呼吸管理及治疗·····(264)
- 四、呼吸器的撤离·····(270)
- 五、集中监护治疗时必须进行的各项检查·····(276)

特发性呼吸窘迫综合征·····(277)

- 一、定义与发病率·····(277)
- 二、临床症状·····(280)

三、预后	(281)
四、病因及病理生理	(282)
五、病理解剖	(283)
六、预防	(284)
七、治疗	(285)
八、血气测定的意义	(286)
九、血气的采血法与测定	(286)
十、经皮氧电极法测定的 PO_2	(287)
中毒及感染性疾病	(290)
一、急性CO中毒	(290)
二、急性安眠药镇静剂中毒	(291)
三、水杨酸中毒	(293)
四、急性酒精中毒	(295)
五、其他	(295)
六、败血症休克	(295)

IV 病例问答

血气测定常用的诺模图

1. Siggaard-Andersen 直线诺模图	(326)
2. Siggaard-Andersen 曲线诺模图	(327)
3. Canizaro, P_{50} 诺模图	(328)
4. Severinghaus 诺模图	(329)
5. 从 PaO_2 求 SaO_2 的诺模图 (Kelman, Nunn诺模图)	(330)

I 血液气体测定的基础

血液气体的含义

太田保世

一、血液气体与酸碱平衡

所谓血液气体 (blood gas)，严格来讲，是指血液中所存在的气体而言。在呼吸空气的情况下，就含量或生理学的意义而论，主要有氧 (O_2)、氮 (N_2)、二氧化碳 (CO_2) 三种气体，此外在血液中尚含有微量的氩 (A)、一氧化碳 (CO) 及稀有气体。

原先“血液气体”一语，主要是指与气体交换或呼吸现象有关的血液中的 O_2 及 CO_2 ，而将 N_2 以及其他惰性气体也作为血液气体来处理则是比较新的观点。只考虑 O_2 、 CO_2 的问题，可说是狭义的血液气体，如图1所示。血液气体测定的结果与解释主要与通气、通气及血流的分布、弥散等所谓肺功能、组织的代谢、气体交换、以及血液的氧合、缓冲作用的程度和循环的状况有关。

然而在实际工作中常常将血液气体测定用作酸碱平衡或调节酸碱平衡的检查，两者之间现已无明显的区别。但将两者完全等同起来也不一定十分恰当。

例如，酸的排泄，每天约由肾排出50—150毫升的1个当量的酸，相应地肺约排出20~40升 CO_2 。即使作为体液恒定

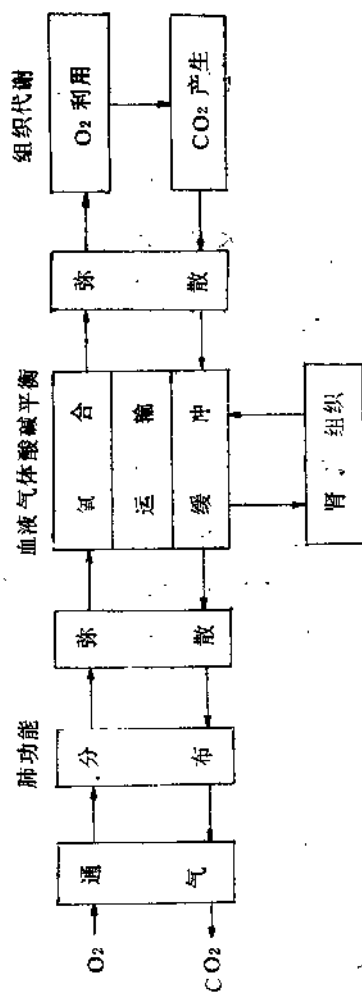


图1 呼吸现象的示意图

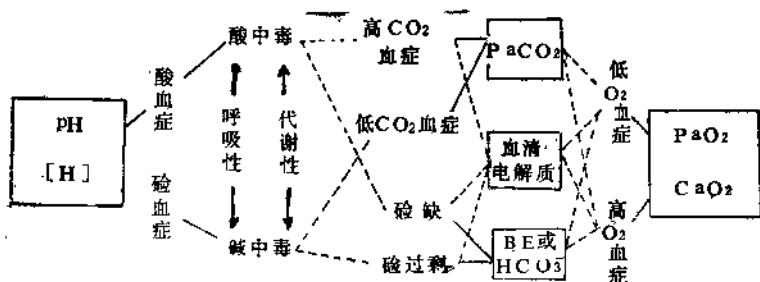


图2 血液气体、酸碱平衡的五个指标的部分

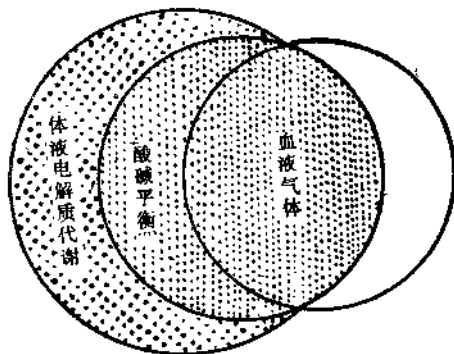


图3 血液气体、酸碱平衡及体液电解质的相互关系

性机制的酸碱平衡考虑，与呼吸功能（血液气体）也是有不可分割的关系，对许多生理现象同样也有密切的联系。因此不能草率地下一个定义。

图2为血液气体与酸碱平衡两者之间的关系示意图。属于血液气体的有动脉血氧分压 PaO_2 、动脉血氧含量 CaO_2 及动脉血二氧化碳分压 $PaCO_2$ ；酸碱平衡的指标有 pH 或 $[H^+]$ ，代谢性因子的碱超（base excess BE）、血浆 HCO_3^- 浓度（ $[HCO_3^-]_p$ ），与作为呼吸性因子指标的 $PaCO_2$ 。

现在一般的测定仪多可同时测得 pH 、 PaCO_2 、 PaO_2 三个结果，因此，益发使血液气体与酸碱平衡呈现不可区分的倾向。

酸碱平衡 对于酸和碱的定义在历史上也有几种不同的说法。现在最为人们所接受的是 Brønsted-Lowry 学说：“所谓酸是质子 $[\text{H}^+]$ 的供体，硷是质子的受体。”这样根据定义，将阳离子作为硷，用阴离子—阳离子平衡 anion-cation balance 代替酸碱平衡，这种老的说法就行不通了。然而酸碱平衡就广泛的体液组成的恒定性的机制而言，作为体液、电解质代谢的一部分来考虑较为妥当（图3）。

酸碱调节 一语大概译自 acid-base regulation 一词，一般认为在使用上与酸碱平衡无甚区别。但停止酸碱平衡这样叫法，提倡“体液平衡反应的调节”叫法的人也有。若能避免酸、硷这种含义上的混乱、重视人体体内的反应过程，调节一语或许较为合适。不管怎样，若能对上面用语的背景有所理解，在日常临床上，就不会对血液气体与酸碱平衡这样用语的分别使用产生误解，忽视电解质的检查。血液气体、酸碱平衡的五项基本指标， pH 、 PaCO_2 、 $[\text{HCO}_3^-]$ ，或 BE 、 PaO_2 ，以及血清电解质的检查，在某种意义上来说只不过是细胞外液检查，对细胞内液状态的一种推测。而动脉血液气体的状况也可视为肺功能的概括，静脉血的血气，可作为来自回流区域气体交换状况的一个指标。但尚须考虑到该领域的代谢、血流及其分布方式，组织结构等种种因素。仅根据这个检查资料作出太多的结论亦并不相宜。

二、血液气体的物理、化学

1. 理想气体的法则

所谓理想气体 (ideal gas or perfect gas) , 实际上只是抽象地存在于物理学中。其定义, 严格按下面的Boyle-Charles法则而论, 内能若除去密度的因素, 就只是温度的问题了。在处理的过程中, 若将实际气体的密度极力搞低, 这样, 说起来是很难的物理学的问題, 在通常的温度、压力下, 就可将实际气体视为非常近于理想的气体。

理想气体的一般法则:

$$P \cdot V = nR \cdot T$$

n : 气体分子数; R : 气体常数。

R 值随所采用的单位而定。例如, 压力为气压, 体积为立升, 温度以绝对温度 (Kelvin scale) 表示时则为0.082。

理想气体据此法则, 若 n 与 R 不变, 气体的压力与体积的乘积被温度除, 其结果也保持不变。

所谓Boyle法则及Boyle-Mariotte法则是以温度保持不变时的一种形态。即,

$$T = P \cdot V$$

Charles氏法则及Gay-Lussac氏法则是压力不变情况下的形态。

$$P = T/V$$

与理想气体法则有关的其他重要的法则有Avogadro法则。即在同一压力与温度时, 体积相同的气体, 不论气体的种类如何, 均含有同样数目的分子。换句话说, 无论气体轻重, 在上述条件下每个分子所占的体积相同。所谓Avogadro数就是1克分子 (mol) 的气体分子数, 即 6.02×10^{23} 。Loschmidt数 (2.687×10^{19} /毫升) 是0°C、760毫米汞柱时理想气体的分子数。

水蒸气的处理很重要。水蒸气的改变不符合理想气体

**表1 吸气(I)、呼气(E)、肺泡气(A)、
动脉血(a)、静脉血(V)的分压与总压**

	I	E	A	a	V
PaCO_2	0	26	39	39	44
PO_2	150	118	102	93	38
PN_2	563	569	572	564	564
$\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$	47	47	47	47	47
Σ	760	760	760	743	693

法则的要求,它的特点,其分压仅取决于温度的变化(虽新的见解这种看法有些修改)。因此,譬如在37℃时为47毫米汞柱,在40℃时就成了55毫米汞柱了。不论气压,也可将某个温度的饱和水蒸气压视为常数。但分压则遵从下述的Dalton氏法则(表1)。

2. Dalton氏法则与分压

在血液气体物理的基础概念中,分压(Partial pressure)的概念是最重要的概念之一。

按Dalton混合气体的分压法则,混合气体的压力,为各自的气体单独所占的容积时的压力,即各自气体分压之和。

现若以空气为例,空气重量所致的大气压(barometric pressure)在地表约为760毫米汞柱,空气的组成从地上到100公里左右高度是不变的, FN_2 78.08%, FO_2 20.95%, FAO_2 0.93%, FCO_2 0.03%。因此,各自气体的分压可用 $P_B \times F$ 求之,即

$$P_B = \text{PN}_2 + \text{PO}_2 + \text{PA} + \text{PCO}_2$$

但在人体中不要忘了 P_{H_2O} ，即水蒸气分压的存在。由于一般认为吸入气会很快地受到体温的饱和水蒸气分压的影响，因此在考虑到人体现象的分压时，必须在 $(P_B - P_{H_2O})$ 的基础上再按各自的浓度来求之。

[例] $P_B = 760$ 毫米汞柱，体温 37°C 时的吸入气氧分压

$$P_{I}O_2 = (760 - 47) \times 0.2095 = 149.4$$

肺及组织中的气体交换是由分压的坡度所致的弥散现象造成的，同样在血液气体中，对气相与液相（血液）之间的平衡也必须从分压的概念来考虑。因此分压这个概念在讨论呼吸功能时就显得非常重要。

3. Henry氏法则与溶解的气体

Henry氏法则指在某一温度时气体溶于液体中的量，与其气体在气相的分压大致成正比而言。当然，Henry氏法则对能与液体发生化学反应的气体，例如， NH_3 、 CO_2 等就不适用，而仅适用于所谓惰性气体的溶解。

一般Henry氏法则可用 $C = \alpha \cdot p / 760$ 来表示。即，溶解气体的含量 C ，可用其气体分压 P 与本生（Bunsen）溶解系数 α 的乘积来表示。所谓本生系数，即其气体分压在760毫米汞柱时用STPD表示的1毫升液体所溶解的气体量（毫升）。故此 α 一般是温度愈低时愈大，再则其也随液体的种类而异。例如以 O_2 为例，在 40°C 及 30°C 时，水的 α ，分别为0.0231与0.0261。这样，在低温等的状况下就意味着氧的溶解量有所增加。

呼吸空气时血中的气体溶解量，若假定体温为 37°C ， $P_A O_2$ 100毫米汞柱， $P_A N_2$ 570毫米汞柱，无肺泡气动脉血分压差的存在时，则

$$O_2 \text{溶解量} = 0.0238 \times 100 / 760 = 0.0031 (\text{毫升/毫升})$$

N_2 溶解量 = $0.0127 \times 570/760 = 0.0095$ (毫升/毫升)

溶解度的表示法除一般的本生系数外,尚有表明一定重量的溶媒的溶解度的Kuenen吸收系数、表明液体在某一温度时的气体量的Ostwald系数等。组织与血液等为了反映对不同溶媒的溶解度之比,一般采用分配系数(Partition coefficient)的方法。例如 N_2 的油/水之比为 $0.0670/0.0127 = 5.28$ 。

4. 气体量的表示法

由于气体容易受温度等影响而改变体积,就产生了气体的量是代表什么样状态下的气体量的问题。一般有BTPS、STPD等表示法,现简述如下:

BTPS 在体温、大气压、饱和水蒸气(Body Temperature, ambient pressure, Saturated with water vapor)的条件下,即BTPS,进行血液气体的测定。这样,若假定肺内(肺泡)温度与人体组织的其他部分相同,而吸入气即可认为完全为体温时的水蒸气所饱和。严格来讲,虽有人认为此与实际情况有些出入,但其差别可以忽略不计。虽类似的尚有BTPD,其除干燥这个条件之外与BTPS完全相同,例如,在用开放回路系统中的 N_2 洗出法测定功能残气量(FRC)等就是以此为条件的。

ATPS 一般在周围的大气中,气温较体温低,水蒸气也较该温度的饱和水蒸气分压低,即湿度不是100%。ATPD是指在周围的温度及压力条件下干燥的状态而言。例如,在湿式的肺量计内的气体,与其温度的水蒸气分压相饱和的状态,即以周围温度,周围压力、饱和水蒸气为条件,即ATPS(Ambient Temperature, ambient pressure, Saturated with water vapor)。

STPD 标准温度, 标准压力, 干燥状态 (Standard Temperature, standard pressure, Dry), 即STPD。特别是适合在 O_2 及 CO_2 的氧化、还原反应以及气体交换等情况下, 不按气体的体积而是按其分子数进行计算时使用。因此, 若以 $0^\circ C$, 760毫米汞柱, 干燥状态为条件, 1克分子的气体占22.4升就便于理解。按STPD的条件来使用的有 $\dot{V}O_2$ 与 $\dot{V}CO_2$ 。

表示法的换算 从STPD换为BTPS, 在呼吸生理学教科书等常附换算表, 若熟悉了前述的气体法则及各个表示方式的意义, 则对以下的换算方法就不难理解。

$$\dot{V}_{STPD} = \dot{V}_{ATPS} \times \frac{273}{(273 + t^\circ C)} \times \frac{[P_B - P_{H_2O}(t^\circ C)]}{760}$$

$$\dot{V}_{STPD} = \dot{V}_{BTPS} \times \frac{273}{310} \times \frac{(P_B - 47)}{760}$$

$$\dot{V}_{BTPS} = \dot{V}_{ATPS} \times \frac{310}{(273 + t^\circ C)} \times \frac{[P_B - P_{H_2O}(t^\circ C)]}{(P_B - 47)}$$

5. 单位与符号

由于血液气体、酸碱平衡的各个指标所用的单位、符号不断有新的补充, 同时有关书籍相互间也有所不同, 故有略加解说的必要。

压力 有以下种种表示法

atm (大气压atmosphere, 绝对气压ata)

bar (= 1.013atm)

Kp $\cdot$ cm $^{-2}$ (= 10000mmH $_2$ O)

msw (海水1米(深)meter of sea water)

= 1.026mmH $_2$ O

psi (平方英吋磅pound per square inch)

Torr (= 1/760 atm)

pa (巴斯卡pascal)

在血液气体中最常用的是毫米汞柱 (mmHg)。即 1 个大气压等于 760 毫米汞柱。但在最近一些与呼吸生理学有关的书籍中尚可见到托 (Torr 或 torr) 这样的单位。此乃 Torricelli 的缩写，严格地讲与毫米汞柱并不相同，但一般仍可以 $\text{mmHg} = \text{Torr}$ 。

国际间有用巴 (pa, 即 pascal) 作为压力的国际单位系统 (SI 单位) 的组成单位之一。1Pa 意味着每一平方米有 1 N (牛顿) 的力, 1N 是对 1 公斤的质量给与每秒每秒 1 米 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) 加速度的压力。1 毫米汞柱等于 133.322 巴, 按千巴 (KPa) 计算时则 100 毫米汞柱等于 13.3322 千巴。

浓度与容积 浓度原则上代表每 1 立方米的克分子浓度, 为了方便, 习惯上容积多以升为单位, 而呈 M/L 的形式。然而在血液气体等情况下常用毫升/毫升 (ml/ml) 或容积 % (vol) % (毫升 %, ml/dl) 等的也有, 但在化学反应的过程中用以讨论 O_2 与 CO_2 等关系时就不很相宜, 故以克分子表示为佳。因此在最近的呼吸生理学的领域中常用毫克分子/升 (mM/L) (有时写成 mmol/L) 为气体含量的单位。

1 克分子 (Mol) 就是前面所说的 Avogadro 数的分子物质量, 由于 1 克分子的气体占有 22,400 毫升的容积, 用 STPD 表示的 1 毫升的气体等于 $1/22,400 \text{ mol}$, 故 1 毫克分子 (mmol) 的气体就等于 STPD 的 22.4 毫升。22.4 这个数字虽可用于毫升与毫克分子间的互换, 但要注意在 CO_2 时为 22.26。

PH 与氢离子浓度

PH 按定义为氢离子浓度 $[\text{H}^+]$ 的负对数, $-\log[\text{H}^+]$ 。然而, 若按上面所说的那样用浓度来表示的话, 氢离子浓度